

# Caractérisation de la sécheresse agronomique en zone semi-aride.

## I. Présentation d'un modèle simple d'évaluation appliqué au cas de l'arachide cultivée au Sénégal

D. J. M. ANNEROSE et M. DIAGNE (1)

**Résumé.** — La caractérisation des formes de sécheresses agronomiques constitue l'étape préalable indispensable dans la réalisation d'un programme d'amélioration des rendements en zones semi-arides. Dans le cas de l'arachide cultivée au Sénégal, un modèle simplifié associant les concepts d'évapotranspiration et de bilan hydrique à des données élémentaires sur la réponse des plantes à la sécheresse a été développé. Après une présentation de ce modèle, il est montré qu'il permet d'effectuer une simulation satisfaisante du bilan hydrique de cette espèce constituant ainsi un outil performant de diagnostic des types de sécheresse.

### INTRODUCTION

Le premier stade d'une démarche visant à améliorer la productivité agricole en zone semi-aride consiste à effectuer une évaluation, la plus fiable possible, des formes de sécheresse auxquelles doivent faire face les espèces végétales cultivées. La précision des informations obtenues à ce stade de l'analyse aide à formuler, de manière réaliste, les principaux objectifs à atteindre pour l'amélioration des rendements dans une zone donnée et peut, ainsi, offrir un gain de temps appréciable dans la recherche du matériel le mieux adapté.

Selon l'utilisation faite de l'eau, selon la région, selon l'activité humaine et notamment les espèces végétales cultivées, la sécheresse apparaît comme un phénomène fréquent ou rare, intense ou faible. Elle reste donc une notion relative dont l'évaluation, à un niveau strictement pluviométrique peut se révéler insuffisante. Ceci est particulièrement vrai dans la zone sahélienne pour laquelle des variations annuelles substantielles de la pluviométrie se manifestent.

Dans ces conditions, une évaluation des formes de sécheresse nécessite de privilégier des méthodes dynamiques de diagnostic. C'est ce que permettent de réaliser les modèles mathématiques simulant le bilan hydrique pluriannuel des cultures en prenant en compte la pluviométrie, la demande évaporative, les caractéristiques hydrodynamiques du sol et les effets des techniques culturales sur la disponibilité en eau et la réaction des plantes à cet environnement.

Au Sénégal, pays fortement touché par la sécheresse (Fig. 1) depuis une vingtaine d'années, peu ou pas de données simples sur la réponse de la plante aux variations de la disponibilité en eau ont été intégrées dans les différents modèles développés (Cocheme et Franquin, 1967 ; Hall et Dancette, 1978 ; Forest, 1984). Ce qui ne permet pas de prendre en compte les effets de la sécheresse sur le développement de la culture et réduit l'analyse, tout au long du cycle, à la répartition de l'eau dans le sol et à son extraction sous l'effet de la demande évaporative.

Dans ce premier article, nous allons décrire et évaluer un outil simple de diagnostic de la sécheresse, appliqué au cas de

l'arachide cultivée au Sénégal. Ce modèle essaie d'associer aux concepts bien connus d'évapotranspiration et de bilan hydrique quelques données élémentaires concernant les effets de la sécheresse sur le développement de la culture, l'importance de ses besoins en eau et sa capacité à les satisfaire.

### PRÉSENTATION DU MODÈLE

La nature élémentaire des données climatiques disponibles au Sénégal (pluviométrie et évaporation bac) a nécessité d'introduire, dans le modèle présenté, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices exposées ci-dessous. Nous avons tenté de profiter de cette contrainte afin de développer un outil pouvant s'adapter à une analyse de la sécheresse agronomique de différentes espèces et dans différentes régions, moyennant uniquement quelques modifications des paramètres d'entrée.

#### Détermination de la pluie de semis.

Le modèle détermine la date de semis selon la méthode de Dancette *et al.* (1976) et Dancette (1978) simplifiée. A partir de ces données et pour chaque région considérée, une intensité minimale pour la pluie de semis (PMIN) et une pluie de semis optimale (PLOPT) ont été définies pour un jour de semis optimum (JOPT) assurant la meilleure probabilité de réussite du semis et de la culture (Tabl. I).

Chaque pluie (pluie) avant semis est comparée à une pluie de semis idéale (PSEM) calculée selon la fonction :

$$PSEM = | \text{jour-JOPT} | \times SEM + PLOPT \quad \text{Equ. 1}$$

avec JOUR étant le jour de manifestation de la pluie et SEM un coefficient permettant de caler PSEM sur les valeurs exprimées par Dancette *et al.* (1976) (Tabl. I).

La décision de semer est prise si la pluie est supérieure ou égale à PSEM et à PMIN ou si la pluie du jour ajoutée à la pluie du jour précédent (jour - 1) est supérieure ou égale à PSEM + 5 et à PMIN. Le facteur 5 exprimé en mm correspond à la quantité moyenne d'eau supposée s'évaporer sur sol nu un jour après une pluie.

#### Distribution de l'eau dans le sol.

Après une pluie l'eau est distribuée dans le sol selon le concept de teneur en eau à la capacité au champ. La capacité

(1) Physiologiste CIRAD/IRHO détaché à l'ISRA et Bioclimatologiste ISRA. Centre National de Recherches Agronomiques. B.P. 53, Bambey (Sénégal)

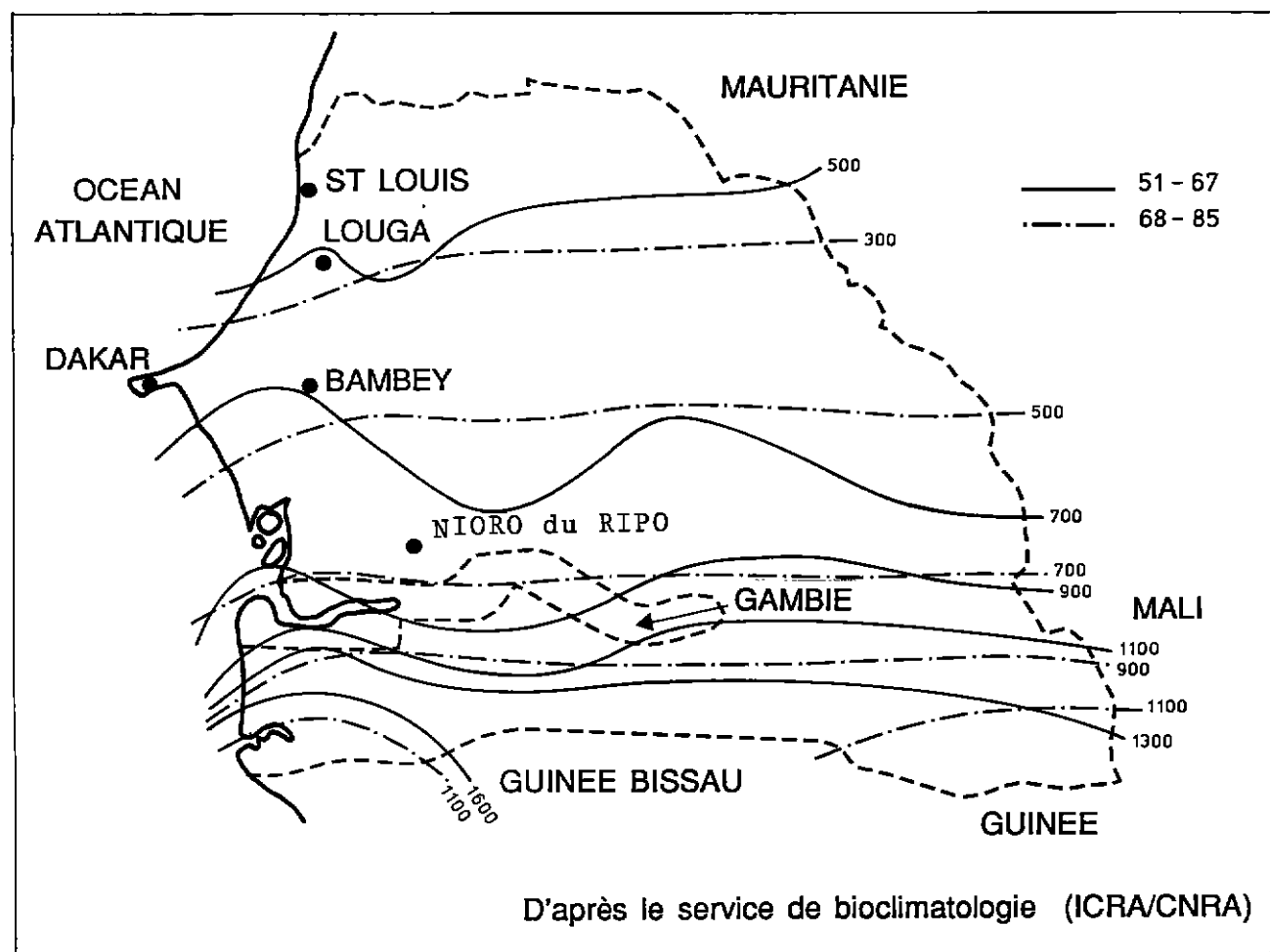


FIG. 1. — Evolution des isohyètes moyens (mm) au Sénégal durant la période 1951-1985 — (*Evolution of mean isohyets (mm) in Senegal during the period 1951-1985*)

au champ de chaque couche de sol est introduite pour les différents types de sol rencontrés au Sénégal (Dancette, 1969 ; Vachaud *et al.*, 1978 ; M. Diagne, communication personnelle).

Après humectation de la première couche à capacité au champ l'excès d'eau est ajouté à la couche suivante. Le calcul se répète, avec des incréments de 10 cm, jusqu'à la dernière couche fixée à 140 cm. Cette profondeur a été choisie à partir des résultats de Chopart (1980) sur la caractérisation du système racinaire de l'arachide.

Le modèle suppose qu'il n'y a pas de transfert ascendant d'eau dans le profil. L'eau passant sous la couche 140 cm est considérée perdue pour la culture. En fait Vachaud *et al.* (1978) ont montré que la cinétique de distribution de l'eau est réellement stabilisée au bout de 3 jours de ressuyage. Durant ces trois jours le modèle remet donc à la disposition de la culture une partie de l'eau supposée perdue (passée sous la cote 140 cm).

#### Demande évaporative.

La demande évaporative est estimée à partir de la mesure journalière de l'évaporation bac normalisé classe A

(EVBAC). Lorsque les données d'EVBAC ne sont pas disponibles pour la localité considérée, elles sont calculées relativement à l'EVBAC de Bambey à partir des coefficients de correction établis par Dancette *et al.* (1979).

#### Evaporation sol nu.

Après une pluie l'intensité des processus évaporatifs ne permet pas une réhydratation complète des couches superficielles par des transferts d'eau provenant des couches les plus profondes. Ceci a pour conséquence de provoquer une déshydratation des couches superficielles et une réduction de l'évaporation sol nu. L'évaporation journalière potentielle du sol nu (ET) est calculée comme étant une fonction décroissante de la racine carrée du nombre de jours écoulés après la dernière pluie (Baver *et al.*, 1972 ; Hall *et al.*, 1978) :

$$ET = ((1 - KCOUV) \times KBAC \times EVBAC) / (JAP)^{0.5} \quad \text{Equ. 2}$$

avec KCOUV égal à la proportion de sol couvert par la culture, KBAC étant un coefficient de correction de l'EVBAC qui rend compte de la différence des processus évaporatifs entre une lame d'eau et le sol et JAP le nombre de jours après la dernière pluie.

TABLEAU I. — Facteurs de détermination de la pluie de semis utile (PSEM) pour 3 régions du Sénégal.  
 $PSEM = |JOUR - JOPT| * SEM + PLOPT$  — (Factors for determining useful sowing rainfall (SOWR) in 3 regions in Senegal  $SOWR = |DAY - OPTD| * SOW + OPTR$ )

Région	JOPT (OPTD) (jours-days)	PLOPT (OPTR) (mm)	PMIN (MINR) (mm)	SEM (SOW)	
				JOUR < JOPT (Day < OPTD)	JOUR > JOPT (Day > OPTD)
Nord (North) (Louga)	01/07	30	15 le 30/07	1,0	— 0,909
Centre nord (Centre-north) (Bambey)	20/06	20	15 le 15/07	2,5	— 0,167
Centre sud (Centre-south) (Nioro)	17/06	20	15 le 15/07	2,5	— 0,179

Exemple : Une pluie de 20 mm (PLOPT) tombée le 20/06 (JOPT) a Bambey offre une chance de réussite du semis supérieure à 90 % (Dancette, 1978)

Dans Arabhy la pluie offrant les mêmes garanties est :

— le 30/06 :  $PSEM = |30 - 20| * (-0,167) + 20$

— le 10/06 :  $PSEM = |10 - 20| * 2,5 + 20$

Exemple : 20 mm of rain (OPTR) falling in Bambey on 20/06 (OPTD) offers a 90 % chance of successful sowing (Dancette, 1978)

At Arabhy, the rainfall offering the same guarantees is

— on 30/06 :  $SOWR = |30 - 20| * (-0,167) + 20$

— on 10/06 :  $SOWR = |10 - 20| * 2,5 + 20$

soit 18,3 mm,

soit 45,0 mm.

i.e. 18,3 mm,

i.e. 45,0 mm

Seuls les 30 premiers centimètres du profil sont supposés contribuer à l'évaporation réelle du sol qui dépend donc de la réserve utile en eau (R.U.) dans cet horizon.

### Consommation en eau du couvert.

La quantité d'eau transpirée est supposée proportionnelle au % de sol couvert par la culture (KCOUV) et à la demande évaporative EVBAC. La transpiration potentielle de la culture (ETCULT) est estimée par la fonction :

$$ETCULT = KCOUV \times KM \times KCULT \times EVBAC$$

Equ. 3

où KCULT est l'équivalent d'un coefficient cultural. Il est estimé pour une culture d'arachide bien irriguée par le rapport (Dancette, 1981) :

$$KCULT = \frac{\text{(Besoins en eau de la culture)}}{\text{(EVBAC normalisé classe A)}}$$

Ce coefficient varie en fonction de l'espèce considérée, des variétés étudiées et de leur stade de développement.

L'évolution de KCULT est simulée par une fonction dépendante du nombre de jours après semis qui permet de caler les valeurs simulées avec celles obtenues par Dancette (1981) pour les différents types variétaux étudiés.

KM est un coefficient qui rend compte des différences de contribution du sol couvert et du sol nu dans les processus évapotranspiratoires de la culture. Il est estimé à chaque instant par la relation :

$$KM = (1 - (KBAC * (1 - KCOUV))) / KCOUV$$

### Extraction de l'eau du sol et satisfaction des besoins en eau de la culture.

La profondeur d'extraction hydrique des racines est déterminée par la cote du front racinaire. La limite d'extraction de

chaque couche de sol est fixée par son point de flétrissement permanent (PFP). Comme pour les valeurs de capacité au champ le PFP par couche de sol est fixé pour les principaux types de sols rencontrés au Sénégal.

La quantité d'eau maximale qui peut être extraite de la couche  $i$  est donc :

$$EVMAX(i) = TETA(i) - PFP(i) \quad \text{Equ. 4}$$

avec TETA (i) représentant la teneur en eau de cette couche.

Le modèle impose une participation de toutes les couches du profil pour la satisfaction des besoins en eau. Cette condition permet d'éviter la manifestation brutale et peu réaliste de points de rupture dans les profils hydriques.

Pour chaque couche de sol en partant des plus superficielles la quantité d'eau potentielle qui peut être extraite est calculée comme étant :

$$EVPOT(i) = DEVAPO \times (N - i + 1) / \sum_{j=1}^N (N - i + 1) \quad \text{Eq. 5}$$

avec DEVAPO égal à la quantité d'eau restant à extraire pour satisfaire la totalité de la demande évaporative et N le nombre de couches restant à analyser y compris la couche  $i$ .

L'absorption réelle de la couche  $i$ , EVAR(i), est la valeur minimale entre EVPOT(i) et EVMAX(i). Le calcul est repris pour la couche suivante  $i + 1$  avec :

$$DEVAPO = DEVAPO - EVAR(i) \quad \text{et } N = N - 1$$

Equ. 6

jusqu'à la cote la plus profonde du profil considéré.

Si à la fin de ce premier cycle de calcul les besoins en eau ne sont pas satisfaits le calcul est repris itérativement au maximum 5 fois afin de déterminer les quantités d'eau réellement évaporées (EVAPOR) et transpirées (TCULT) par la culture.

Cette méthode de calcul permet d'optimiser les variations d'humidité du sol en associant toutes les couches. Elle permet de considérer que la contribution d'une couche donnée est d'autant plus importante qu'elle est humide et est située dans les horizons supérieurs. De plus l'arachide ayant un système racinaire pivotant dont la densité diminue à mesure que l'on atteint les horizons inférieurs (Robertson *et al.*, 1980 ; Chopart, 1980 ; Boote, 1982), cette méthode satisfait à l'hypothèse de répartition de l'extraction hydrique par la culture dans les différentes couches de sol en fonction de la densité racinaire relative.

Après détermination de la quantité réelle d'eau perdue par évaporation (EVAPOR) et de la quantité transpirée par les plantes (TCULT) le taux de satisfaction des besoins en eau de la culture est déterminé par le rapport :

$$TSAT = (EVAPOR + TCULT) / (ET + ETCULT) \quad \text{Equ. 7}$$

La culture d'arachide est considérée en situation de stress lorsque TSAT est inférieur à 0,7. Dancette (1981) estime que pour l'ensemble des cultures le seuil d'alerte pour la productivité est situé à 0,8 mais il admet un risque d'erreur de 10 % sur le calcul des besoins en eau. Par ailleurs, son calcul est effectué sur l'ensemble du cycle ce qui n'exclut pas la manifestation des périodes où TSAT journalier serait inférieur à 0,8 pour un TSAT sur le cycle supérieur à cette valeur.

Le choix de fixer le TSAT seuil à la valeur la plus basse (0,7) permet en fait de privilégier une certaine rusticité du matériel végétal dans l'optique d'une stabilisation de la productivité au risque d'une légère perte les années les plus favorables.

### Développement de la culture.

Le modèle simule l'évolution de 2 paramètres de développement de la culture : le taux de couverture qui permet de déterminer les besoins en eau de la culture, et la croissance racinaire qui déterminera les dimensions du réservoir de sol exploité.

### Taux de couverture.

Trois phases ont été distinguées dans le développement de la culture (Fig. 2).

1) Une phase allant du semis à la levée durant laquelle le taux de couverture est évidemment nul (phase de levée). La date de levée est fixée au 4<sup>e</sup> jour après semis ;

2) Une phase allant de la levée jusqu'à la couverture totale du sol par la culture (phase de développement végétatif) ;

3) Une phase allant de la fin de la mise en place définitive du taux de couverture jusqu'à la récolte. Durant cette période le modèle suppose que la défoliation de l'arachide en fin de cycle est faible et ne provoque pas de diminution du taux de couverture. Il considère aussi que la diminution des surfaces transpirantes qui en résulte est déjà prise en compte par la réduction des coefficients culturaux (KCULT) durant cette phase.

Si les conditions d'alimentation hydrique sont idéales durant la 2<sup>e</sup> phase, le modèle estime que pour une variété de longueur de cycle connue, la couverture du sol par la culture est complète à JPOT (KCOUV = 1). JPOT dépend de la longueur potentielle du cycle de la variété étudiée et de son port (érigé ou rampant), la densité de semis étant supposée

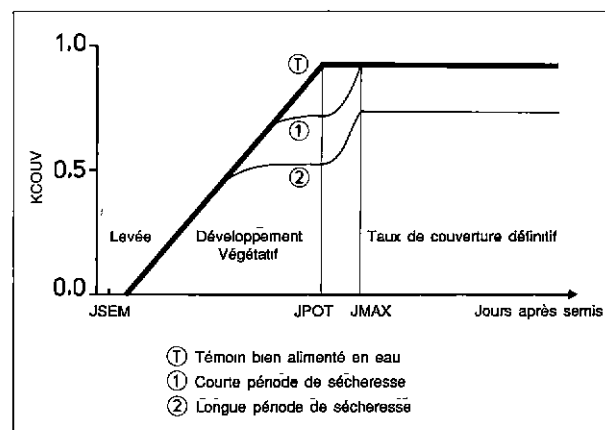


FIG. 2 — Evolution du taux de couverture du sol par la culture (KCOUV) simulé dans le modèle d'évaluation de la satisfaction des besoins en eau de l'arachide — (Evolution in the rate of soil cover by the crop (KCOV), simulated in the model for assessing groundnut water requirement satisfaction)

optimale. L'accroissement journalier maximal de KCOUV est donc :

$$VMKCOUV = 1/(JPOT-3) \quad \text{Equ. 8}$$

La principale conséquence de la réduction de la transpiration en conditions de déficit hydrique est une diminution de la photosynthèse. Durant la phase végétative, les assimilats étant principalement mobilisés en direction de l'appareil végétatif et des racines, le modèle suppose que l'évolution de KCOUV est ralentie en conditions de déficit hydrique (TSAT < 0,7) pour s'annuler 5 jours après le début du stress. Le décalage de la réponse photosynthétique par rapport au début de manifestation de la sécheresse repose sur l'hypothèse que ce mécanisme n'est pas uniquement sous la dépendance des facteurs de régulation stomatique mais dépend aussi de la capacité de tolérance au déficit hydrique de la plante (Ackerson *et al.*, 1981 ; Bunce, 1977 ; O'Toole *et al.*, 1976 ; Matthews *et al.*, 1984).

Une autre hypothèse prise en compte par Arabhy est que l'activation des mécanismes d'adaptation sous l'effet de la sécheresse favorise une reprise rapide lorsque les conditions hydriques redeviennent satisfaisantes (Annerose, 1985). Ceci se traduit par une vitesse de récupération légèrement supérieure à la vitesse d'installation du stress.

Enfin un décalage des phases du développement peut se produire en condition de déficit hydrique chez l'arachide (Annerose, 1985). Le modèle considère que le décalage maximum de la phase du développement végétatif est de 10 jours (JMAX = JPOT + 10). A cette date le taux de couverture est définitivement fixé et on suppose que les assimilats nouvellement fixés sont mobilisés pour la formation des gousses.

### Système racinaire.

Le développement du système racinaire est représenté uniquement par l'avancée du front racinaire. Le modèle considère que la densité racinaire sur l'ensemble du profil permet d'extraire toute l'eau disponible.

Dès le semis et en conditions hydriques favorables la colonisation en profondeur du système racinaire se fait à une



vitesse maximale de 2,5 cm/jour (Lea, 1961 ; Chopart, 1980 ; Boote *et al.*, 1982 ; Annerose, 1988).

Si l'humidité de la couche la plus profonde est inférieure au point de flétrissement permanent, l'augmentation de la résistance à la pénétration du sol qui en résulte se traduit par une diminution de la vitesse d'avancée du front racinaire. À partir de ce point l'élongation racinaire diminue de manière linéaire et s'annule pour des humidités volumiques du sol de 2,5 %.

Lorsqu'un déficit hydrique se manifeste, nous avons fixé l'hypothèse que durant le stade végétatif, la plante investit préférentiellement ses assimilats en direction des racines. En fait le modèle considère simplement que l'élongation racinaire ne s'annule que lorsque le taux de couverture n'évolue plus en cas de stress. Cette hypothèse est supportée par les nombreux travaux qui mettent en évidence, chez d'autres espèces, une augmentation du rapport parties racinaires sur parties aériennes lors d'un déficit hydrique durant la phase végétative (Sharma et Ghidyal, 1977 ; Huck *et al.*, 1986 ; Kmoch *et al.*, 1987).

À la fin de la phase de développement végétatif, lorsque le taux de couverture maximal est atteint, le modèle considère que les caractéristiques du système racinaire sont définitivement fixées.

Le modèle est écrit en langage BASIC interprété et peut être exécuté sur un ordinateur à configuration de base. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de fichiers ASCII et peuvent être ainsi facilement repris et analysés avec des logiciels standards.

Le résultat de ses simulations est évalué à partir de données obtenues sur des essais conduits au champ. Chaque dispositif était constitué de 4 à 6 parcelles de 12 m × 12 m au centre desquelles étaient installés des tubes d'accès pour sonde à neutron. Les relevés pluviométriques et d'évaporation-bac ont ainsi permis d'établir sur chaque parcelle le bilan hydrique de la culture.

### Quelques éléments de validation et discussion.

Étant donné le grand nombre d'hypothèses simplificatrices introduites dans ce modèle sa vocation ne peut être, dans l'état actuel, de simuler précisément le développement d'une variété présentant des caractéristiques particulières d'adaptation à la sécheresse. Par exemple, l'absence de données précises concernant l'effet d'un déficit hydrique sur la transpiration de l'arachide nous a conduit à considérer que les possibilités de régulation de ce processus étaient réduites. De même le modèle ne prend pas en compte l'existence possible de réserves en eau dans le sol en début de campagne et ne considère que la pluviométrie de la saison pour satisfaire les besoins en eau de la culture.

En fait, avec ce modèle, nous mettons en évidence les périodes de développement de la culture durant lesquelles il est nécessaire que les plantes présentent des mécanismes d'adaptation sans présager de la nature précise de ceux existant dans la variété étudiée.

Ces différentes considérations ajoutées au fait que le modèle procède automatiquement à une optimisation de la date de semis et donc de la durée du cycle complique sa validation. Ainsi en 1987, dans le cadre d'un essai de suivi du bilan hydrique d'une culture d'arachide, nous avons pris la décision de semer le 28 juillet une variété de 90 jours, 73-30 (Spanish), après une pluie de 28 mm afin de réduire les risques de sécheresse en début de cycle. Le modèle par contre propose un semis le 20 juillet après une pluie de 16 mm.

En forçant la simulation à démarrer au jour réel de semis on constate, malgré les écarts de la consommation en eau

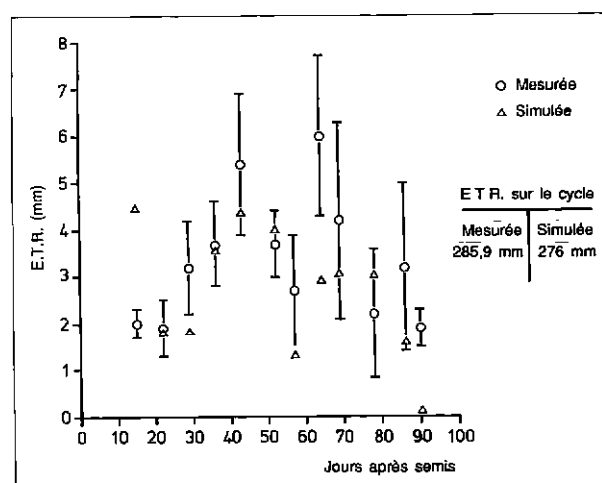


FIG 3 — Evapotranspiration journalière moyenne mesurée et simulée pour une culture d'arachide durant la saison des pluies en 1987 à Bambe. — (Mean daily evapotranspiration, measured and simulated for a groundnut crop during the 1987 rainy season at Bambe.)

observés en début et en fin de cycle, que les valeurs d'évapotranspiration simulées quotidiennement et sur l'ensemble du cycle restent principalement à l'intérieur de l'intervalle de confiance ( $\alpha = 5\%$ ) des valeurs moyennes mesurées (Fig. 3).

Puisque le modèle optimise le choix de la date de semis, la comparaison des valeurs de taux de satisfaction des besoins en eau observés pour une date de semis simulée et réelle fournit une appréciation sur la possibilité d'améliorer les chances de réussite d'une culture en inscrivant mieux son cycle dans la période utile de la saison des pluies.

Les résultats obtenus à Bambe en 1987 indiquent que le choix du semis précoce effectué dans le modèle réduit les risques de sécheresse de fin de cycle qui se manifestent lorsque le semis est effectué le 28 juillet. Le semis précoce aurait permis à la variété de boucler entièrement son cycle tout en consommant un supplément de 30 mm d'eau sur l'ensemble du cycle (Fig. 4). Cependant, la simulation de l'évolution du taux de couverture pour les deux dates de semis indique que les sécheresses de début de cycle ont été suffisamment importantes pour ralentir le développement végétatif de la culture. Le taux de couverture maximal simulé est ainsi de 98 % pour la culture semée le 20/07/90 et de 96 % pour le semis du 28/07/87.

Une évaluation du modèle a été aussi effectuée à partir des valeurs d'évapotranspiration mesurées sur un essai conduit à Nioro-du-Rip avec la variété 73-33 (Virginia, 105 jours) durant la saison des pluies 1987 (Fig. 5). Cet essai a été semé un mois après le début des premières pluies. Malgré une valeur d'évapotranspiration simulée sur l'ensemble du cycle de développement de la culture inférieure à celle mesurée, le modèle simule de manière correcte sur de courtes périodes les valeurs d'évapotranspiration mesurées.

Le semis tardif a peu affecté le développement végétatif aérien de la culture (Fig. 6) dont les besoins en eau ont été correctement satisfaits sur l'ensemble du cycle. Le taux de

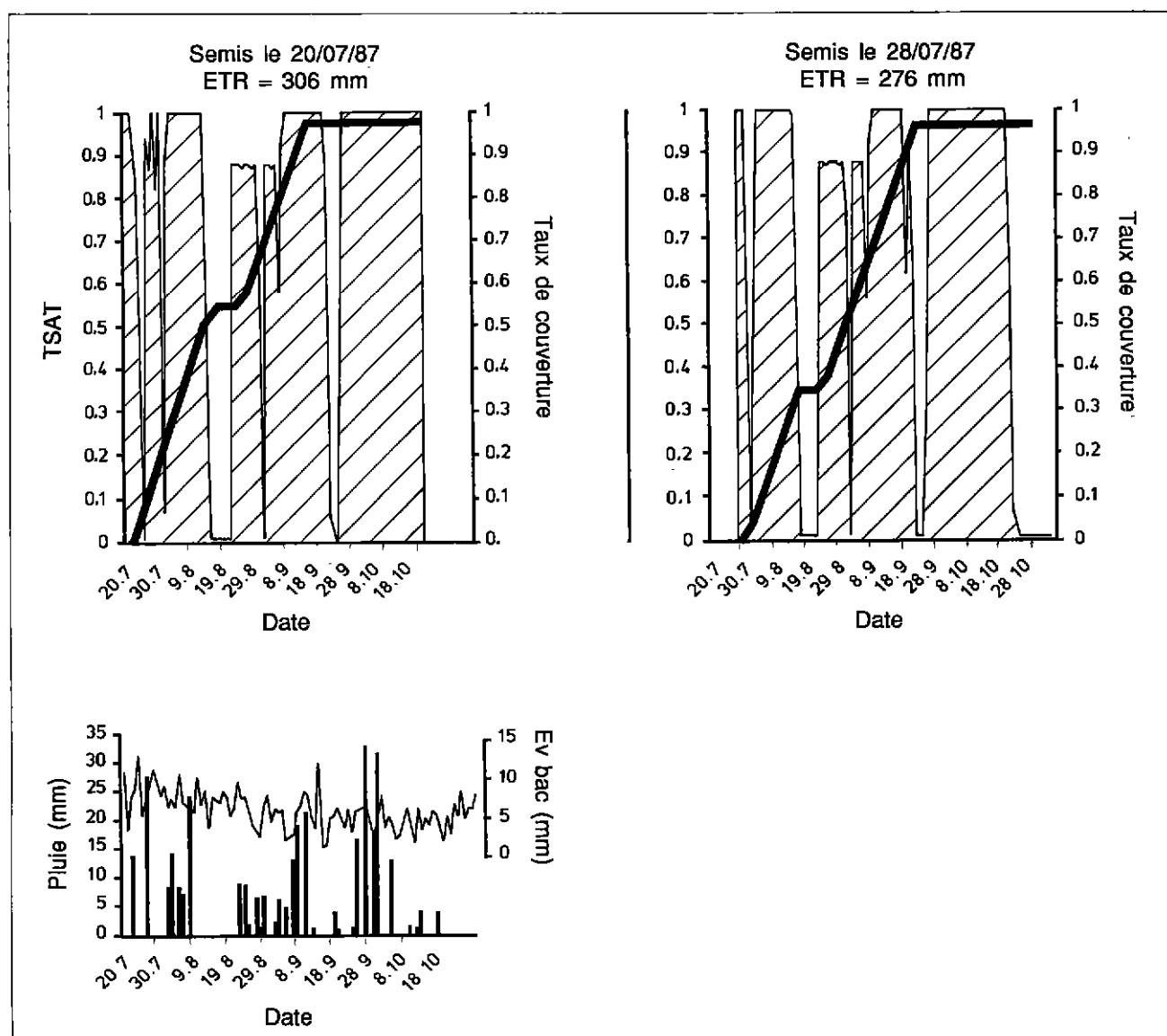


FIG. 4. — Taux de satisfaction des besoins en eau (TSAT) et taux de couverture du sol simulés pour une culture d'arachide à 2 dates de semis durant la saison des pluies 1987 à Bambeï. — (Water requirement satisfaction rate (SAT) and soil cover rate simulated for a groundnut crop on 2 sowing dates during the 1987 rainy season at Bambeï).

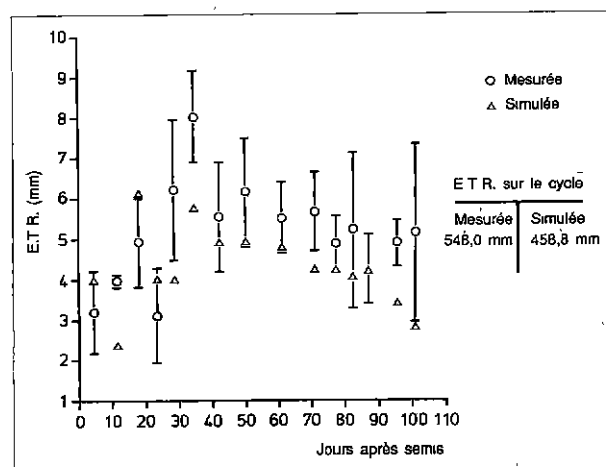


FIG 5 — Evapotranspiration journalière moyenne mesurée et simulée pour une culture d'arachide durant la saison des pluies en 1987 à Nioro-du-Rip. Variété 73-33 (cycle de 105 jours). — (Mean daily evapotranspiration, measured and simulated for a groundnut crop during the 1987 rainy season at Nioro-du-Rip. Variety 73-33 105 day cycle).

couverture maximal du sol (100 %) est atteint au 54<sup>e</sup> jour après semis. La croissance racinaire est ralentie en début de cycle principalement sous l'effet de l'augmentation de la résistance à la pénétration du sol par les racines. La profondeur d'enracinement maximale simulée, 87 cm, a été atteinte au 60<sup>e</sup> jour après semis alors que la profondeur d'humectation simulée se situait sous la côte des 140 cm.

A ce stade de développement le modèle en optimisant le choix de la date de semis permet de mieux définir, pour une variété donnée et dans une zone définie, la durée utile de la saison des pluies. Par ailleurs l'évaluation du taux de satisfaction des besoins en eau de la culture permet d'identifier à une échelle journalière les périodes de sécheresse qu'elle subit en cours de cycle. Ces deux informations sont indispensables pour la définition des types de sécheresse agronomique rencontrés. Comme nous le verrons dans un prochain article (Annerose, 1991) une méthode de simulation comme celle décrite ici peut constituer un outil pratique de diagnostic des formes de sécheresse à l'échelle régionale, facilitant ainsi l'identification des objectifs d'amélioration à atteindre pour des cultures conduites en zone aride ou semi-aride.

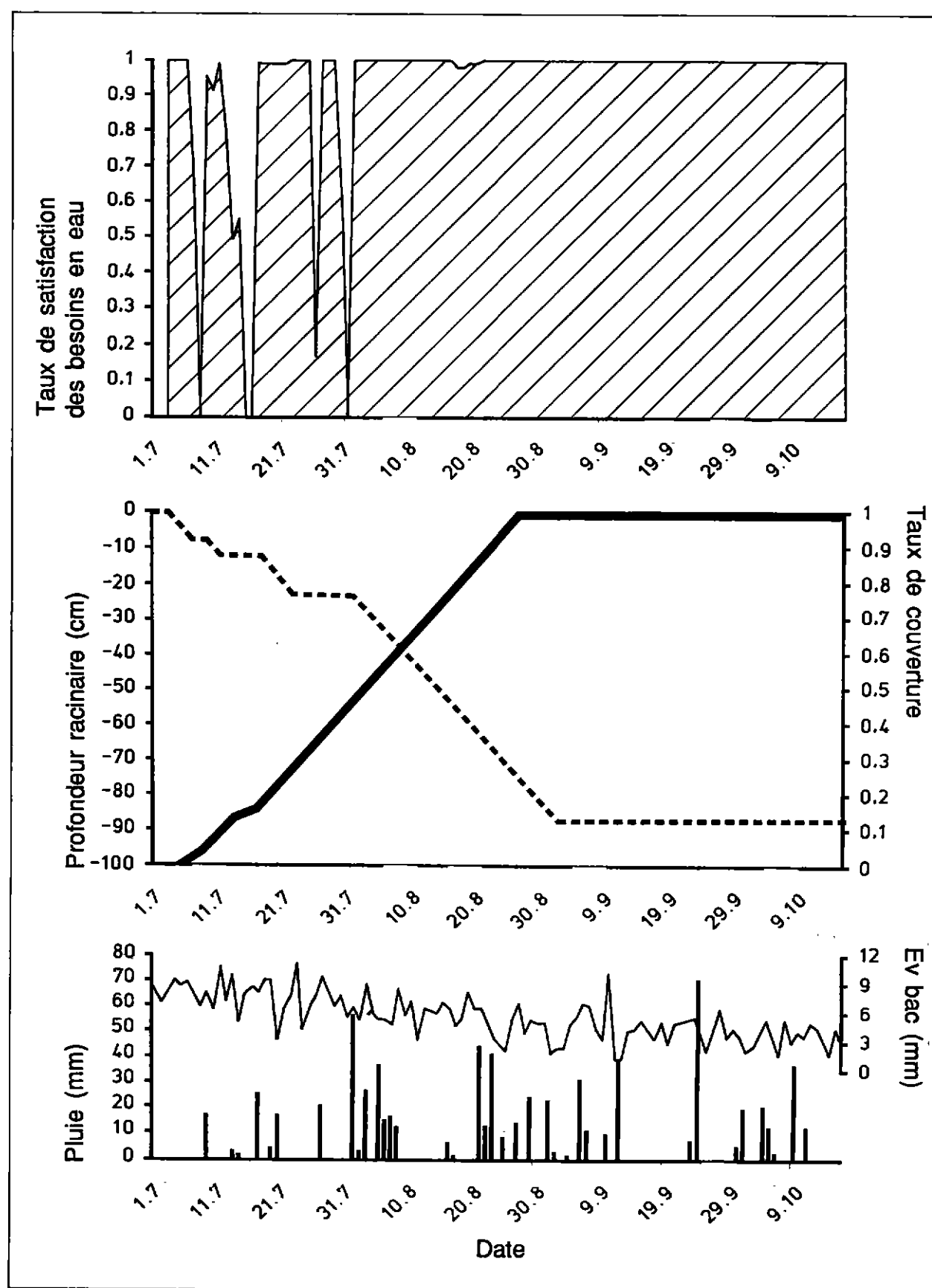


FIG 6. — Taux de satisfaction des besoins en eau, taux de couverture du sol et profondeur d'enracinement simulés pour une culture d'arachide (73-33) durant la saison des pluies 1987 à Nioro-du-Rip (Semis le 3/07/87) — (Water requirement satisfaction rate, soil cover rate and root depth simulated for a groundnut crop — 73-33 — during the 1987 rainy season at Nioro-du-Rip - Sowed on 03/07/87)

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] ACKERSON R. C. et HEBERT R. R. (1981). — Osmoregulation in cotton in response to water stress I Alterations in photosynthesis, leaf conductance, translocation, and ultrastructure. *Plant Physiol*, **67**, 484-488.
- [2] ANNEROSE D. J. M. (1985). — Réponses d'une variété d'arachide soumise à des sécheresses d'intensité croissante durant différentes phases de son cycle. Doc. ISRA/CNRA Bambey 41 pages
- [3] ANNEROSE D. J. M. (1988). — Critères physiologiques pour l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse de l'arachide. *Oléagineux*, **43**, (5), 217-220.
- [4] ANNEROSE D. J. M. (1991). — Caractérisation de la sécheresse en zone semi-aride II Evaluation des formes de sécheresse agronomique de l'arachide au Sénégal par simulation du bilan hydrique de la culture. *Oléagineux*, à paraître février 1991.
- [5] BAVER L. D., GARDNER W. H. et GARDNER W. R. (1972). — Soil physics. John Wiley and Sons, New York, 4th edition, 498 pages
- [6] BOOTE K. J., STANSELL J. R., SHUBERT A. M. et STONE J. F. (1982). — Irrigation, water use and water relations. In « Peanut science and Technology ». Pate N. E. et Young C. T. (Eds) A.P.R.E.S., Yoakum Texas 77995 164-205.
- [7] BUNCE J. A. (1977). — Non stomatal inhibition of photosynthesis at low water potentials in intact leaves of species from a variety of habitats. *Plant Physiol*, **59**, 348-350
- [8] CHOPART J. L. (1980). — Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (Arachide Mil-Sorgho-Riz pluvial). Thèse I.N.P. Toulouse, 162
- [9] COCHEME J. et FRANQUIN P. (1967). — An agroclimatology survey of a semi-arid area in Africa south of Sahara. Tech. note world. meteorol. organ., **86**, 1-136
- [10] DANCETTE C. (1969). — Détermination au champ de la capacité de rétention après irrigation dans un sol sableux du Sénégal. Intérêt agronomique de cette mesure et application à une culture d'arachide. *Agro. Trop*, **25**, 3
- [11] DANCETTE C. (1978). — Estimation des chances de réussite de 3 types d'arachide (90, 105 et 120 jours) à partir de l'analyse pluviométrique Programme Brunet Moret (ORSTOM) Cas de Bambey. Doc ISRA/CNRA Bambey Sénégal, 16 pages.
- [12] DANCETTE C. (1981). — Méthode pratique d'estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales au Sénégal. Doc ISRA/CNRA Bambey Sénégal, 26 pages.
- [13] DANCETTE C. et HALL A. E. (1979). — Agroclimatology applied to management in the sudanian and sahelian zones of Africa. In « Agriculture in semi arid environments ». Pages 98-118 Ecological studies 34 Hall A. E., Cannell G. H. et Lawton A. W. (eds) Berlin Heidelberg New York 340 pages
- [14] DANCETTE C. et SOW C. S. (1976). — Analyse agroclimatologique de la saison des pluies en vue de faciliter les choix de la recherche et du développement agricoles (Le cas de Niour du Rip). Doc. ISRA/CNRA Bambey Sénégal 6 pages
- [15] FOREST F. (1984). — Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP. GERDAT Montpellier
- [16] HALL A. E. et DANCETTE C. (1978). — Analysis of fallow farming system in semi-arid Africa using a model to simulate the hydrologic budget. *Agron. J.*, **70**, 816-823
- [17] HUCK M. G., PETERSON C. M., HOOGENBOOM Gerrit et BUSH C. D. (1986). — Distribution of dry matter between shoots and roots of irrigated and non irrigated determinate soybeans. *Agron. J.*, **78**, 813 pages.
- [18] KMOCH H. G., RAMIG R. E., FOX R. L. et KOEHLER F. E. (1957). — Root development of winter wheat as influenced by soil moisture and fertilization. *Agron. J.*, **49**, 20-25.
- [19] LEA J. D. (1961). — Studies on depth and rate of root penetration of some annual tropic crops. *Trop. Agric. Trin.*, **38**, 93-105.
- [20] MATTHEWS A. M. et BOYER J. S. (1984). — Acclimation of photosynthesis to low leaf water potentials. *Plant Physiol*, **74**, 161-166.
- [21] O'TOOLE J. C., CROOKSTON R. K., TREHARNE K. J. et OZBUN J. L. (1976). — Mesophyll resistance and carboxylase activity. *Plant Physiol*, **57**, 465-468
- [22] ROBERTSON W. K., HAMMOND L. C., JOHNSON T. T. et BOOTE K. J. (1980). — Effects of plant-water stress on root distribution of corn, soybeans and peanuts in sandy soil. *Agron. J.*, **72**, 548-550
- [23] SHARMA R. B. et GHILGYAL B. P. (1977). — Soil water root relation in wheat. water extraction rates of wheat that developed under dry and moist conditions. *Agron. J.*, **69**, 231-233.
- [24] VACHAUD G., DANCETTE C., SONKO S. et THONY J. L. (1978). — Méthodes de caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. *Ann. Agron.*, **29**, 1-36.

## SUMMARY

**Characterization of agricultural drought in semi-arid zones. I. Description of a simple assessment model applied to cultivated groundnut in Senegal.**

D. J. M. ANNEROSE and M. DIAGNE, *Oléagineux*, 1990, **45**, N° 12, p. 547-557.

Characterization of agricultural drought forms is essential prior to undertaking a yield improvement programme in semi-arid zones. A simplified model combining evapotranspiration and water balance concepts with basic data on plant responses to drought has been developed for cultivated groundnut in Senegal. After describing this model, the article goes on to show that it can be used to provide a satisfactory simulation of this species' water balance, and is therefore an effective tool for diagnosing drought types

## RESUMEN

**Caracterización de la sequía agronómica en áreas semiáridas. I. Presentación de un modelo sencillo de evaluación aplicado al caso del maní cultivado en Senegal.**

D. J. M. ANNEROSE y M. DIAGNE, *Oléagineux*, 1990, **45**, N° 12, p. 547-557.

La caracterización de las formas de sequía agronómica constituye la etapa previa indispensable a la realización de un programa de mejora de los rendimientos en las áreas semiáridas. En el caso del maní cultivado en Senegal, se ha desarrollado un modelo simplificado que asocia los conceptos de evapotranspiración y de balance hídrico con datos elementales sobre la respuesta de las plantas a la sequía. Después de presentar este modelo, se demuestra que permite realizar una simulación satisfactoria del balance hídrico de esta especie que por lo tanto viene a constituir un instrumento eficaz de diagnóstico de los tipos de sequía.



# Characterization of agricultural drought in semi-arid zones.

## I. Description of a simple assessment model applied to cultivated groundnut in Senegal

D. J. M. ANNEROSE and M. DIAGNE (1)

### INTRODUCTION

The first step in a process aimed at improving agricultural productivity in a semi-arid zone consists in conducting as reliable as possible an assessment of the drought forms that cultivated plant species will have to face. The accuracy of the information obtained at this stage of the analysis helps in realistically formulating the main objectives to be achieved in order to improve yields in a given zone and can save a considerable amount of time in the search for the most suitable material.

Drought may be a frequent or rare, intense or weak phenomenon, depending on how water is used, the region involved, human activities and, especially, the types of plant species cultivated. It therefore remains a relative concept, whose assessment in purely rainfall terms may prove inadequate. This is particularly true in the Sahel zone, where annual rainfall variations are considerable.

Under these conditions, any assessment of drought forms needs to lean towards dynamic diagnosis methods. Such an approach makes it possible to develop mathematical models simulating the multi-annual water balance of crops, taking into account rainfall, evaporative demand, hydrodynamic characteristics of the soil, the effects of cropping techniques on water availability and plant reaction to this environment.

In Senegal, which has been severely affected by drought (Fig. 1) for twenty years or so, little or no simple data on plant responses to water availability variations have been integrated into the different models developed (Cochene and Franquin, 1967; Hall and Dancette, 1978; Forest, 1984). This means that it is impossible to take into account drought effects on crop development and the analysis is reduced throughout the cycle to water distribution in the soil and its extraction under the influence of evaporative demand.

In this first article, we shall describe and assess a simple drought diagnosis tool, applied to groundnut in Senegal. This model is linked to the well-known evapotranspiration and water balance concepts concerning the effects of drought on crop development, the extent of water requirements and its ability to meet them.

### DESCRIPTION OF THE MODEL

The basic nature of the climatic data available in Senegal (rainfall and evaporation pans) meant that a certain number of simplifying hypotheses, set out below, had to be included in the model described. We have attempted to make the most of this need for simplicity so as to develop a tool that can be adapted to an analysis of agricultural drought in different species and different regions, merely requiring a few modifications to the input parameters.

#### Determination of sowing rainfall.

The model determines the sowing date using a simplified version of the method described by Dancette *et al.* (1976) and Dancette (1978). Based on these data, and for each region considered, minimum sowing rainfall intensity (MINR) and optimum sowing rainfall (OPTR) were defined for an optimum sowing day (OPTD) ensuring the greatest probability of successful sowing and cultivation (Table I).

Each fall of rain (rain) before sowing is compared to ideal sowing rainfall (SOWR), calculated as follows:

$$\text{SOWR} = |\text{DAY-OPTD}| \times \text{SOW} + \text{OPTR} \quad \text{Eq. 1}$$

where DAY is the day rain falls and SOW a coefficient used to adjust SOWR to the values expressed by Dancette *et al.* (1976) (Table I).

The decision to sow is taken if rain is greater than or equal to SOWR and MINR or if the rain on the day added to the rain of the previous day (day - 1) is greater than or equal to SOWR + 5 and to MINR. The factor 5, expressed in mm, corresponds to the mean quantity of water assumed to evaporate from bare soil one day after rainfall.

#### Water distribution in the soil.

After rainfall, the water is distributed in the soil according to the water content to field capacity concept. The field capacity of each layer of soil is entered for the different types of soils encountered in Senegal (Dancette, 1969; Vachaud *et al.*, 1978; M. Diagne, personal communication).

After moistening the first soil layer up to field capacity, the surplus water moves on to the next layer. The calculation is repeated, with 10 cm increments, down to the final layer which is fixed at 140 cm. The choice of this depth was based on the results obtained by Chopart (1980) on characterization of the groundnut root system.

The model assumes that there is no upward transfer of water in the profile. The water moving into the 140 cm layer is considered to be lost to the crops. In fact, Vachaud *et al.* (1978) showed that water distribution kinetics are actually stabilized after 3 days' drying out. During these three days, the model returns part of the water presumed lost (descended below the 140 cm mark), to the crops.

#### Evaporative demand.

Evaporative demand is estimated from the daily measurement in the standardized class A evaporation pan (EVPAN). If EVPAN data are not available for the location in question, they are calculated relative, to the EVPAN in Bambey using correction coefficients established by Dancette *et al.* (1979).

#### Evaporation from bare soil.

After rainfall, the intensity of evaporative processes prevents total rehydration of the upper layers by water transfer from the deepest layers. This leads to dehydration of the upper layers and lower bare soil evaporation. Potential daily evaporation from bare soil (ET) is calculated as being a decreasing function of the square root of the number of days since the last rainfall (Baver *et al.*, 1972; Hall *et al.*, 1978):

$$\text{ET} = ((1 - \text{KCOV}) \times \text{K PAN} \times \text{EVPAN}) / (\text{DSR})^{0.5} \quad \text{Eq. 2}$$

where KCOV is the proportion of soil covered by the crop, K PAN a coefficient of EVPAN correction, which takes into account the difference in the evaporative processes between a sheet of water and the soil, and DSR the number of days since the last rainfall.

Only the first 30 centimetres of the profile are assumed to contribute towards actual evaporation from the soil, which therefore depends on the available reserve (A.R.) in this horizon.

#### Plant cover water consumption.

The quantity of water transpired is assumed to be proportional to the percentage of soil covered by the crop (KCOV) and evaporative demand (EVPAN). The plant's potential transpiration (CROPET) is estimated as follows:

$$\text{CROPET} = \text{KCOV} \times \text{KM} \times \text{KCROP} \times \text{EVPAN} \quad \text{Eq. 3}$$

(1) IRHO/CIRAD physiologist seconded to ISRA and ISRA bioclimatologist. Centre National de Recherches Agronomiques, B.P. 53, Bambey (Senegal)

where KCROP is the equivalent of a crop coefficient. It is estimated for a well irrigated groundnut crop by the ratio (Dancette, 1981) :

$$\text{KCROP} = \frac{\text{(Crop's water requirements)}}{\text{(Standardized class A EVPAN)}}$$

This coefficient varies depending on the species considered, the varieties studied and their development stage.

The change in KCROP is simulated by a function depending on the number of days after sowing, which makes it possible to adjust the simulated values to those obtained by Dancette (1981) for the different varieties studied.

KM is a coefficient that takes into account the differences in the contribution made by covered soil and bare soil in the crop's evapotranspiration processes. It is estimated at each moment by :

$$\text{KM} = (1 - (\text{KPAN} * (1 - \text{KCOV}))) / \text{KCOV}$$

Water extraction from the soil and satisfaction of the crop's water requirements.

The depth to which water is extracted by the roots is determined by the depth of the root tips. The extraction limit of each soil layer is fixed by its permanent wilting point (PWP). As for the field capacity values, the PWP for each soil layer is determined for the main types of soil encountered in Senegal.

The maximum quantity of water that can be extracted from the layer,  $i$ , is therefore :

$$\text{MAXEV}(i) = \text{WCON}(i) - \text{PWP}(i) \quad \text{Eq. 4}$$

where WCON( $i$ ) is the water content of this layer.

The model imposes participation of all the layers in the profile in meeting water requirements. This condition makes it possible to avoid sudden and somewhat unrealistic breakage points in the water profiles.

For each soil layer starting from those nearest the surface, the potential quantity of water that can be extracted is calculated as :

$$\text{POTEV}(i) = \text{EVAPOD} \times (N - i + 1) / \sum_{i=1}^N (N - i + 1) \quad \text{Eq. 5}$$

where EVAPOD is equal to the quantity of water remaining to be extracted to meet total evaporative demand and  $N$  the number of layers remaining to be analyzed, including layer  $i$ .

Actual absorption from layer  $i$ , AEVA( $i$ ) is the minimum value between POTEV( $i$ ) and MAXEV( $i$ ). The calculation is resumed for the following layer  $i + 1$ , where

$$\text{EVAPOD} = \text{EVAPOD} - \text{AEVA}(i) \text{ and } N = N - 1 \quad \text{Eq. 6}$$

down to the deepest profile considered.

If water requirements are not met at the end of the first calculation cycle, the calculation is repeated iteratively up to a maximum of 5 times, so as to determine the quantities of water actually evaporated (AEVAP) and transpired (CROPT) by the crop.

This calculation method makes it possible to optimize soil moisture variations by combining all the layers. It makes it possible to consider that the contribution of a given layer is greater the wetter it is and the nearer to the surface it is located. In addition, as groundnut has a tap root system, whose density reduces as it reaches the lower horizons (Robertson *et al.*, 1980 ; Chopart, 1980 ; Boote, 1982), this method satisfies the hypothesis that water extraction by the plant is distributed throughout the different soil layers according to relative root density.

Once the actual quantity of water lost through evaporation (AEVAPO) and the quantity transpired by the plants (CROPT) have been determined, the crop water requirements satisfaction rate is determined as follows :

$$\text{SATR} = (\text{AEVAPO} + \text{CROPT}) / (\text{ET} + \text{CROPET}) \quad \text{Eq. 7}$$

A groundnut crop is considered to be under stress when SATR is below 0.7. Dancette (1981) estimates that for all crops, the alert threshold for productivity is at 0.8, but he accepts a 10 % risk of error in the water requirement calculation. Moreover, his calculation is done for the entire cycle, which does not rule out the occurrence of periods where daily SATR is under 0.8 for a complete cycle SATR over this value.

Fixing the SATR threshold at the lowest value (0.7) in fact makes it possible to favour a certain hardness in the planting material, with a view to stabilizing productivity at the risk of a slight loss in the most favourable years.

## Crop development.

The model simulates changes in 2 of the plant's development parameters : the plant cover rate, which makes it possible to determine the crop's water requirements and root growth, which will determine the size of the soil volume explored.

## Plant cover rate.

Three stages can be distinguished in crop development (Fig. 2).

1) A phase ranging from sowing to emergence during which the plant cover rate is obviously nil (emergence phase). The emergence date is fixed at the 4th day after sowing.

2) A phase ranging from emergence to total ground cover by the crop (vegetative development phase).

3) A phase ranging from the time final plant cover is established up to harvesting. During this period, the model assumes that groundnut defoliation at the end of the cycle is low and causes no reduction in the plant cover rate. It also considers that the resulting reduction in transpiration areas is already taken into account by the reduction in the crop coefficients (KCROP) during this phase.

If water supply conditions are ideal during the 2nd phase, the model estimates that for a variety of unknown cycle length, soil cover by the crop is complete at POTD (KCROP = 1). POTD depends on the potential length of the cycle for the variety studied, along with its growth habit (erect or spreading) — sowing density is presumed to be optimum. The maximum daily increase in KCOV is therefore :

$$\text{KCOVMS} = 1 / (\text{POTD} - 3) \quad \text{Eq. 8}$$

The main effect of reducing transpiration under water deficit conditions is to reduce photosynthesis. As the assimilates are mainly directed towards the aerial parts and the roots during the vegetative phase, the model assumes that the evolution of KCOV is slowed down under water stress conditions (SATR < 0.7), cancelling itself out 5 days after the start of stress. The delay in photosynthetic response compared to the beginning of the drought phenomenon is based on the hypothesis that the mechanism not only depends on stomatal regulation factors, but also on the plant's water stress tolerance capacity (Ackerson *et al.*, 1981 ; Bunce, 1977 ; O'Toole *et al.*, 1976 ; Matthews *et al.*, 1984).

Another hypothesis taken into account by Arabhy is that the activation of adaptation mechanisms under the effect of drought favours rapid recovery when water supply conditions become adequate again (Annerose, 1985). This leads to a recovery rate slightly higher than the stress establishment rate.

Finally, development phases may become staggered in groundnut under water stress conditions (Annerose, 1985).

The model considers that the maximum lag for the vegetative development phase is 10 days (MAXD = OPTD + 10). On this date, the cover rate is definitively fixed and it is assumed that the new assimilates fixed are mobilized for pod formation.

## Root system.

Root system development is represented solely by the advance of the root front. The model considers that root density throughout the profile enables all the available water to be extracted.

Immediately on sowing and under favourable water supply conditions, downward colonization by the root system takes place at a maximum speed of 2.5 cm/day (Lea, 1961 ; Chopart, 1980 ; Boote *et al.*, 1982 ; Annerose, 1988).

If the moisture in the deepest layer is lower than the permanent wilting point, the resulting increase in the soil's resistance to penetration causes the root front to advance more slowly. From this point onwards, root elongation falls linearly and stops for soil moisture voluminal rates of 2.5 %.

Where a water deficit occurs, we have set the hypothesis that during the vegetative stage, the plant sends its assimilates primarily to the roots. In fact, the model simply considers that root elongation only stops when the cover rate evolves no further in the event of stress. This hypothesis is backed up by a large amount of work which, in other species, reveals an increase in the root parts : aerial parts ratio in the event of a water deficit during the vegetative phase (Sharma and Ghudyal, 1977 ; Huck *et al.*, 1986 ; Kmoch *et al.*, 1987).

At the end of the vegetative development phase, when the maximum cover rate is reached, the model considers that root system characteristics are definitively fixed.

The model is written in interpreted BASIC language and can be used on a computer with a basic configuration. The results obtained are shown in the form of ASCII files and can therefore easily be used and analyzed with standard software packages.

The simulation results are assessed using the data obtained from field trials. Each design contained 4 to 6 12 m × 12 m plots in the centre of which neutron probe access tubes were installed. Rainfall and evaporation pan records thus made it possible to establish the crop's water balance on each plot.

#### A few validation elements and discussion.

In view of the large number of simplifying hypotheses introduced into this model, it cannot, in its current state, be used to accurately simulate the development of a variety with particular drought adaptation characteristics. For example, the absence of accurate data on the effect of a water deficit on groundnut transpiration led us to consider that the possibilities of regulating this process were limited. Likewise, the model does not take into account the possible existence of water reserves in the soil at the start of a campaign and only considers the season's rainfall for meeting the crop's water requirements.

In fact, with this model, we reveal the periods of crop development during which it is necessary for the plants to bring adaptation mechanisms into play, without considering the precise nature of those existing in the variety being studied.

These different considerations, added to the fact that the model automatically optimizes the sowing date, hence the cycle length, complicate its validation. Hence in 1987, in a groundnut crop water balance monitoring trial, we decided to sow a 90-day variety, 73-30 (Spanish) on 28th July, after 28 mm of rainfall, so as to limit drought risks at the start of the cycle. On the other hand, the model proposes 16th July as the sowing date, after 16 mm of rainfall.

If the simulation is forced to begin on the actual sowing date, it is seen that the evapotranspiration values simulated daily and over the entire cycle remain primarily within the confidence interval ( $\alpha = 5\%$ ) of the mean values measured (Fig. 3), despite water consumption variations observed at the beginning and end of the cycle.

Since the model optimizes the choice of sowing date, a comparison between the water requirement satisfaction rate values observed for simulated and actual sowing dates provides an idea of the possibility of improving a crop's success by accommodating its cycle better within the useful period of the rainy season.

The results obtained at Bambey in 1987 show that the early sowing choice made in the model reduced the risks of drought at the end of the cycle that occur when sowing is carried out on 28th July. Early sowing would seem to have enabled the variety to complete its cycle whilst consuming an additional 30 mm of water over the cycle as a whole (Fig. 4). However, simulation of cover rate evolution for the two sowing dates indicated that droughts at the beginning of the cycle were severe enough to slow down the crop's vegetative development. The maximum cover rate simulated was therefore 98 % for the crop sowed on 20/07/90 and 96 % for the crop sowed on 28/07/87.

The model was also assessed using evapotranspiration values measured in a trial conducted at Nioro-du-Rip with variety 73-33 (Virginia, 105 days) during the 1987 rainy season (Fig. 5). This trial was sowed a month after the rains started. Despite the fact that the evapotranspiration value simulated for the crop's development cycle as a whole was lower than that measured, the model satisfactorily simulates the measured evapotranspiration values over short periods.

Late sowing had little effect on the crop's aerial part development (Fig. 6), whose water requirements were adequately met over the cycle as a whole. The maximum soil cover rate (100 %) was reached on the 54th day after sowing. Root growth was slowed down at the start of the cycle, mainly due to the soil's increased resistance to root penetration. The maximum simulated root depth, 87 cm, was reached on the 60th day after sowing, whereas the simulated moistening depth was under the 140 cm mark.

At this stage of development, the model, by optimizing the choice of sowing date, makes for a better definition of the useful duration of the rainy season, for a given variety in a specified zone. Moreover, an assessment of the plant's water requirement satisfaction rate makes it possible to define the drought periods it is subjected to during its cycle on a daily basis. These two items of information are essential for defining the types of agricultural drought encountered. As we shall see in an upcoming article (Annerose, 1991), a simulation method such as that described here can be a useful tool in diagnosing drought forms on a regional scale, thereby simplifying definition of the improvement targets to be reached for crops grown in arid or semi-arid zones.